



Universidade do Minho

Mestrado em Engenharia Civil

Processos e Gestão da Construção

Dissertação

Modelo Simplificado de Previsão do Comportamento Térmico de Edifícios

Mestrando

Licenciado Ricardo Jorge Alves Silvestre Lobão

Orientador

Professora Doutora Maria Manuela O. G. de Almeida

Guimarães, Janeiro de 2004

*À minha mulher Cila,
aos meus pais,
e aos meus amigos.*

Resumo

O tema deste trabalho prende-se com a necessidade de, nos dias de hoje, encontrar uma ferramenta técnica que responda aos diversos tipos de tipologia construtiva existente sob o ponto de vista de uma análise térmica comparativa entre os vários constituintes da envolvente. Na certeza de que, cada vez mais, e na observância das novas Directivas Europeias, os factores relacionados com o conforto térmico assumem uma maior importância no contexto global dos edifícios, definiu-se um programa de cálculo automático, baseado num modelo teórico existente, e que assenta numa plataforma de programação que permite uma maior contextualização e interacção entre o utilizador e os modelos matemáticos até agora utilizados.

O trabalho agora proposto tem como objectivo a simulação de situações concretas representando soluções construtivas diversas, sendo capaz de antecipar conclusões quanto às diferentes tipologias estruturais e de organização espacial, permitindo maximizar o conceito de conforto térmico dos espaços.

Este modelo, designado de “*mpcte*” foi desenvolvido em linguagem de programação *Visual Basic 6.0* e permite ao utilizador definir quer em termos físicos quer em termos espaciais toda a envolvente em estudo, incluindo as suas coordenadas no globo terrestre (latitude e longitude). O modelo permite também o carregamento de um ficheiro climático, representativo da localização do espaço em estudo, que não é mais que o conjunto das medições horárias da temperatura exterior e da radiação solar. Em termos de resultados, podemos obter *outputs* que avaliam a evolução das temperaturas interiores e a inércia térmica em termos horários durante todo o período de simulação.

Palavras-chave:

Ferramentas de simulação térmica de edifícios, avaliação do conforto térmico, inércia térmica, construção sustentável.

Abstract

The work performed arose due to the necessity now-a-days for a technical tool that can adequately perform a comparative analysis between the various elements of a compartment with regards to different types of construction typologies.

Ever more, and in accordance with the new European Directives, the factors related to thermal comfort assume a greater importance within the global context of buildings. Therefore, a software was developed, based on an existing theoretical model, that allows for greater contextualization and easier interaction in between the user and the mathematical models now available.

The objective of the proposed work is to simulate realistic situations defining the diverse constructive solutions, being able to predict conclusions with regards to the different structural typologies and the spatial organization, allowing the maximization of the concept of spatial thermal comfort.

The software, named “*mpcte*”, was developed using the *Visual Basic 6.0* programming language. It allows the user to define the surrounding space, both in physical and spatial terms, including the coordinate on the earth surface (longitude and latitude). The model can also load a climatic file, representing the space under study, with regards to the variation in time of the external temperatures and solar radiation. The results show the time evolution (hourly values) of the compartment interior temperatures and of the thermal inertia associated to the space throughout the simulation period.

Keywords:

Building thermal simulation tools, thermal comfort assessment, thermal inertia, sustainable construction.

Resumé

Le sujet de ce travail se tient avec le besoin de, à nos jours, trouver un outil technique qui puisse répondre aux différents types de typologie constructive existante sur l'endroit d'une analyse thermique comparative entre les différents constituants de l'enveloppe. Certes que, de plus en plus, et dans l'observance des nouvelles Directives Européennes, les facteurs rapportés au confort thermique prennent une importance plus forte au contexte global des bâtiments, on a défini un programme de calcul automatique fondé sur un modèle théorique existante, et qui se porte sur une plate-forme de programmation qui permet une majeure contextualisation et une plus facile interaction entre l'utilisateur et les modèles mathématiques utilisés jusqu'au moment.

Le travail proposé maintenant a le but de simuler des situations concrètes en représentant des solutions constructives variées capables d'anticiper des conclusions en ce qui concerne les différents typologies structurales et de l'organisation spatiale, en permettant maximiser le concept de confort thermique des espaces.

Ce modèle, dénommé de "*mpcte*" a été développé dans le langage de programmation *Visual Basic 6.0* et permet à l'utilisateur définir soit en termes physiques soit en termes spatiales tout l'enveloppe en étude, compris ses coordonnées au globe terrestre (latitude et longitude). Le modèle permet encore le chargement d'un fichier climatique, représentatif de la localisation de l'espace en étude, l'assemblage des méditations horaires de la température extérieure et de la radiation solaire. En ce qui concerne les résultats, on peut obtenir *outputs* qu'évaluent l'évolution des températures intérieures et de l'inertie thermique en termes horaires pendant tout le période de simulation.

Keywords:

Outils de simulation thermique des édifices, évaluation du confort thermique, inertie thermique, construction soutenable.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, à Professora Manuela Almeida, minha orientadora científica, cujo interesse e empenho foram fundamentais para a concretização desta tese.

Agradeço também a todos os autores e investigadores cujo trabalho e pensamento fui conhecendo através de livros e artigos, e com quem aprofundei o gosto por este tema, que considero de supra importância para o futuro de uma construção sustentada.

À minha esposa pelo apoio constante, paciência e compreensão demonstrados.

Simbologia e Notações

A	Área do elemento (m^2)
a	Coeficiente de absorção
ar	Azimute do elemento (graus)
as	Azimute do Sol (graus)
$azimute$	Ângulo horizontal medido em relação ao Norte (graus)
C_{eff}	Capacidade térmica efectiva do compartimento ($MJ/^{\circ}C$)
$ceffi$	Capacidade térmica efectiva do elemento ($MJ/^{\circ}C$)
e_i	Espessura do elemento (m)
$envidraçado/parede direita$	Distância do envidraçado à parede direita (m)
$envidraçado/parede esquerda$	Distância do envidraçado à parede esquerda (m)
ET	Equação do tempo (horas)
FRV	Factor de redução do envidraçado (varia entre 0 e 1)
fs	Factor de sombreamento
$fsolar$	factor solar do vão envidraçado
fsp	factor solar da protecção do vão envidraçado
fsv	factor solar do vidro
G	Radiação exterior (W/m^2)
hs	Ângulo solar (graus)
I	Radiação incidente nos elementos da envolvente ($MJ/^{\circ}C$)
U	Coeficiente global de perdas ($W/m^2/^{\circ}C$)
$largura$	Largura do compartimento (m)
$latitude$	Latitude (graus)
$longitude$	Longitude (graus)
N	Número de renovações de ar por hora
$pé direito$	Pé direito do compartimento (m)
$período de simulação$	Período de simulação do estudo (dias)
$profundidade$	Profundidade do compartimento (m)
Q_{arm}	Calor armazenado nos elementos da envolvente ($MJ/^{\circ}C$)
Q_{pe}	Perdas pela envolvente ($MJ/^{\circ}C$)
Q_{pi}	Perdas por infiltração ($MJ/^{\circ}C$)
R_i	Radiação incidente nos elementos da envolvente ($MJ/^{\circ}C$)
$Text$	Temperatura exterior ao compartimento ($^{\circ}C$)

T_{int}	Temperatura interior do compartimento (°C)
TSV	Tempo solar verdadeiro (horas)
V	Volume do compartimento (m ³)
α	Altura solar (graus)
δ	Declinação solar (graus)
ΔT	Amplitude térmica interior (°C)
λ_i	Condutibilidade térmica da camada i (W/mK)
α_{int}	Coefficiente de convecção da face interior (W/m ² K)
α_{ext}	Coefficiente de convecção da face exterior (W/m ² K)

Índice do Trabalho

Resumo	3
Abstract	4
Resumé	5
Agradecimentos	6
Notações e Unidades	7
Índice do Trabalho	9
Índice de Figuras	13
Índice de Tabelas	17
 Capítulo 1 – Introdução	 18
1.1 Enquadramento do trabalho	18
1.2 Objectivos do trabalho	19
1.3 Motivação	19
1.4 Metodologia, organização e estrutura do texto	20
 Capítulo 2 – A questão energética associada aos edifícios	 22
2.1 Construção sustentável	22
2.2 O comportamento energético dos edifícios	24
2.3 Factores que afectam o comportamento térmico dos edifícios	27
2.4 Arquitectura bioclimática – conceitos para um edifício sustentável	31
2.4.1 Soluções para arrefecimento no Verão	32
2.4.1.1 Protecção da radiação	32
2.4.2.2 Sistemas de arrefecimento evaporativo	35
2.4.1.3 Ventilação	36
2.4.2.4 Iluminação	39
2.4.2 Soluções para aquecimento no Inverno	41
2.4.2.1 Captação solar	41
2.4.3 Incentivos à aplicação do conceito	43
2.4.3.1 Casos concretos de aplicação	44
2.5 Enquadramento legal enquanto suporte do conceito	46
2.5.1 Directivas, normas e regulamentos ligados ao comportamento térmico dos edifícios em Portugal	48

2.5.1.1 Âmbito de aplicação dos regulamentos RCCTE e RSECE	50
2.5.1.2 Regulamento de características de comportamento térmico de edifícios (RCCTE)	51
2.5.1.3 Regulamento dos sistemas energéticos de climatização em edifícios (RSECE)	52
2.6 Ferramentas para avaliação do comportamento térmico dos edifícios	53
Capítulo 3 – Metodologia	55
3.1 Introdução	55
3.2 Balanço energético de um espaço	55
3.2.1 Introdução	55
3.2.2 Solicitações exteriores	57
3.2.3 Perdas pela envolvente opaca	57
3.2.4 Perdas por infiltração	58
3.2.5 Ganhos solares	59
3.2.6 Capacidade térmica efectiva de um compartimento	60
3.3 Quantificação da capacidade de armazenamento térmico de elementos construtivos	61
3.3.1 Método de cálculo da quantidade de calor armazenado diariamente	62
3.3.2 Solicitações exteriores	63
3.3.3 Calor armazenado em vários elementos	64
3.4 Método de cálculo da temperatura ambiente interior	66
3.5 Desenvolvimento do modelo de cálculo	67
3.5.1 Geometria solar	68
3.5.1.1 Pavimento	70
3.5.1.1 Paredes laterais	71
3.5.1.1 Parede do fundo	72
3.6 Modelação dos elementos da envolvente	73
3.6.1 Dados gerais do programa	74
3.6.2 Elementos de parede	74
3.6.3 Elementos de cobertura	75
3.6.4 Elementos de pavimento	76
3.6.5 Elementos de envidraçado	77
3.6.5.1 Factor solar do vão envidraçado	77

3.7.5.2 Factor de sombreamento (f_s)	78
Capítulo 4 – Implementação do modelo num programa de cálculo automático	79
4.1 Caracterização geral	79
4.2 Utilizando o programa	79
4.2.1 Como iniciar um trabalho	80
4.2.2 Caracterização da envolvente	82
4.2.2.1 Definição de elementos de parede	83
4.2.2.2 Definição de elementos de cobertura	86
4.2.2.3 Definição de elementos de pavimento	88
4.2.2.4 Definição de elementos de envidraçados	91
4.2.3 Carregamento do ficheiro climático	93
4.2.4 Executando o cálculo	97
4.2.5 Trabalhar com os comandos dos menus	100
4.2.5.1 Comando “adicionar”	100
4.2.5.2 Comando “editar”	101
4.2.5.3 Comando “eliminar”	101
4.2.5.4 Comando “duplicar”	102
4.2.5.5 Comando “sair”	102
4.2.5.6 Comando “ajuda”	103
4.2.6 Como utilizar o comando de “Ajuda”	103
4.2.6.1 Como utilizar	104
4.2.6.2 Índice remissivo	104
4.2.6.3 Palavra-chave	106
4.2.6.4 Aspecto final da ajuda disponibilizada	107
4.2.7 Ficheiros gerados pelo programa	109
4.2.7.1 Ficheiro de dados	109
4.2.7.2 Ficheiro de resultados	110
Capítulo 5 – Aplicação do programa a um caso prático	111
5.1 Introdução	111
5.2 A célula de teste	111
5.3 Recolha de dados	115
5.4 Validação do modelo matemático desenvolvido	115

Capítulo 6 – Conclusões	119
6.1 Conclusões gerais	119
6.2 Perspectivas de trabalho futuro	121
Referências bibliográficas	122
Bibliografia	126
Anexo A – Calor armazenado por elementos construtivos típicos dos edifícios de Portugal, em função da amplitude térmica e da energia solar incidente	134
Tabela A1.1 Paredes interiores	135
Tabela A1.2 Lajes interiores	136
Tabela A1.3 Lajes de pavimento sobre espaços interiores não aquecidos	138
Tabela A1.4 Lajes de cobertura sob espaços interiores não aquecidos	140
Tabela A1.5 Pano interior de parede dupla	144
Tabela A1.6 Paredes exteriores simples, isoladas pelo exterior	145

Índice de Figuras

Figura 2.1	Ciclo da vida	22
Figura 2.2	Influência da zona climática de implantação dos edifícios nas suas necessidades energéticas, em função do nível de isolamento	27
Figura 2.3	Influência da forma nas necessidades energéticas em função da orientação .	28
Figura 2.4	Influência do tipo de inércia em função do nível de isolamento dos elementos	29
Figura 2.5	Exemplo de um programa de modelação que permite calcular as pontes térmicas	30
Figura 2.6	Avaliação da eficiência energética dos diversos tipos de parede, em função do isolamento	31
Figura 2.7	Avaliação da eficiência energética dos diversos tipos de envidraçado, em função do tipo de caixilharia	31
Figura 2.8	Exemplo de palas fixas numa situação de Inverno (à esquerda) e Verão (à direita)	33
Figura 2.9	Influência do ângulo de incidência da radiação na sua penetração. Inverno (em cima), Verão (em baixo)	33
Figura 2.10	Exemplo de sombreamento natural	34
Figura 2.11	Exemplo de sombreamento com uma árvore de folha de caduca no Inverno (à esquerda) e no Verão (à direita)	35
Figura 2.12	Exemplo de sombreamento com uma trepadeira	35
Figura 2.13	Exemplo de um sistema “ <i>roof spraying</i> ”	36
Figura 2.14	Óculo circular destinado à ventilação da sala	36
Figura 2.15	Pormenor do funcionamento da chaminé solar	37
Figura 2.16	Esquema de funcionamento de um sistema de arrefecimento/ventilação durante um dia de Verão	38
Figura 2.17	Plano do piso térreo da “Casa Solar de Porto Santo” em Porto Santo	38
Figura 2.18	Edifício com elevada área envidraçada	39
Figura 2.19	Exemplos de mecanismos de captação solar	41
Figura 2.20	Exemplo de uma parede de captação solar	42
Figura 2.21	Casa Schäfer, Porto Santo. Fotografia do aspecto exterior de uma parede de Trombe; esquema do seu funcionamento consoante as estações do ano	43
Figura 2.22	Edifício “The Foyer”	45

Figura 2.23	Edifício “Torre Verde”	46
Figura 3.1	Esquema do compartimento simulado	56
Figura 3.2	Balanço energético do espaço em estudo	56
Figura 3.3	Equação do tempo	69
Figura 3.4	Área do pavimento atingida pela radiação solar	70
Figura 3.5	Radiação solar que entra no compartimento	71
Figura 3.6	Área da parede lateral que recebe radiação solar	72
Figura 3.7	Área da parede de fundo que recebe radiação solar	73
Figura 4.1	Organograma do programa	80
Figura 4.2	Janela de entrada do programa	80
Figura 4.3	Menu “ <i>Projecto</i> ” de entrada do programa	81
Figura 4.4	Janela de definição de dados gerais do projecto	81
Figura 4.5	Menu “ <i>Dados</i> ”	82
Figura 4.6	Janela referente a “ <i>Dados de Paredes</i> ”	83
Figura 4.7	Janela de alerta para introdução de paredes	84
Figura 4.8	Janela para definição de elemento de parede	84
Figura 4.9	Mensagem de alerta de limite máximo de elementos	85
Figura 4.10	Janela de “ <i>Dados de Paredes</i> ” com um elemento definido	85
Figura 4.11	Janela de “ <i>Dados de Paredes</i> ” completamente definida	86
Figura 4.12	Janela referente a “ <i>Dados de Coberturas</i> ”	86
Figura 4.13	Janela para definição de elemento de cobertura	87
Figura 4.14	Mensagem de alerta de limite máximo de elementos.....	88
Figura 4.15	Janela de “ <i>Dados de Coberturas</i> ” com um elemento definido	88
Figura 4.16	Janela referente a “ <i>Dados de Pavimentos</i> ”	89
Figura 4.17	Janela para definição de elemento de pavimento	89
Figura 4.18	Mensagem de alerta de limite máximo de elementos	90
Figura 4.19	Janela de “ <i>Dados de Pavimentos</i> ” com um elemento definido	90
Figura 4.20	Janela referente a “ <i>Dados de Envidraçados</i> ”	91
Figura 4.21	Janela para definição de elemento de envidraçado	92
Figura 4.22	Mensagem de alerta de limite máximo de elementos	92
Figura 4.23	Janela de “ <i>Dados de Envidraçados</i> ” com um elemento definido	93
Figura 4.24	Introdução de ficheiro de dados de elementos climáticos	94

Figura 4.25	Dados de elementos climáticos por introdução de valores	95
Figura 4.26	Dados de elementos climáticos por introdução de valores – Radiação	95
Figura 4.27	Dados de elementos climáticos por introdução de valores – Temperatura	95
Figura 4.28	Dados de elementos climáticos por leitura de ficheiro	96
Figura 4.29	Mensagem de falta de carregamento do ficheiro climático	97
Figura 4.30	Menu de gráficos gerados pelo programa	98
Figura 4.31	Gráfico <i>Temperatura – Tempo</i> gerado pelo programa	98
Figura 4.32	Gráfico <i>Amplitude Térmica – Tempo</i> gerado pelo programa	99
Figura 4.33	Gráfico <i>Ceff – Tempo</i> gerado pelo programa	99
Figura 4.34	Gráfico <i>Ceff – Amplitude Térmica</i> gerado pelo programa	100
Figura 4.35	Comando <i>adicionar</i> elementos	100
Figura 4.36	Comando <i>editar</i> elementos	101
Figura 4.37	Janela de definição de elemento a editar	101
Figura 4.38	Comando <i>eliminar</i> elementos	101
Figura 4.39	Janela de definição de elemento a eliminar	102
Figura 4.40	Comando <i>duplicar</i> elementos	102
Figura 4.41	Janela de definição de elemento a duplicar	102
Figura 4.42	Comando <i>sair</i>	102
Figura 4.43	Comando <i>ajuda</i>	103
Figura 4.44	Aceder aos menus de “Ajuda”	103
Figura 4.45	Como utilizar a <i>ajuda</i>	104
Figura 4.46	Menu do índice remissivo	105
Figura 4.47	Menu do índice	106
Figura 4.48	Menu de ajuda por palavra-chave	107
Figura 4.49	Ajuda referente a elemento de cobertura	108
Figura 4.50	Ficheiro de dados	109
Figura 4.51	Ficheiro de resultados	110
Figura 5.1	A célula de teste estudada – CAT1	112
Figura 5.2	Planta, alçados e corte do CAT1	112
Figura 5.3	Elementos da envolvente	114
Figura 5.4	Gráfico comparativo entre os valores da temperatura medida e simulada na CAT1	116
Figura 5.5	Evolução do <i>Ceff</i> ao longo do período de simulação (horas)	117

Figura 5.6	Evolução do C_{eff} ao longo do período de simulação (dias)	117
Figura 5.7	Variação do C_{eff} com a amplitude térmica	117
Figura 5.8	Capacidade térmica efectiva e temperatura ambiente interior	118
Figura 5.9	Capacidade térmica efectiva e radiação solar exterior	118

Índice de Tabelas

Tabela 2.1	Valores do consumo de energia para um edifício de qualidade mínima	26
Tabela 2.2	Âmbito da aplicação nos edifícios de habitação	50
Tabela 2.3	Âmbito da aplicação nos edifícios de serviços	51
Tabela 5.1	Coordenadas da CAT1	111
Tabela 5.2	Dimensões da CAT1	111
Tabela 5.3	Propriedades térmicas dos materiais constituintes da envolvente	113
Tabela 5.4	Coeficientes de convecção, emissividade e coeficiente de absorção dos materiais da envolvente	114
Tabela 5.5	Coeficientes U dos elementos	114
Tabela 5.6	Espessura e coeficiente U do vidro	115